

## Modeling of Groundwater Flow of Qalgachi Coastal Aquifer to Evaluate Salt Water Intrusion Using GM

Nosrat Aghazadeh<sup>1</sup> , Farzan Zokaie<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran.

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 09 February 2025

Revised 17 July 2025

Accepted: 06 August 2025

Published online 29 March 2026

#### Keywords

Aquifer

Groundwater model

Qalgachi

Salt water intrusion

GMS

### ABSTRACT

**Objective:** The escalating demand for water resources in recent decades has driven intensified groundwater extraction, resulting in declining aquifer levels and deteriorating water quality. In coastal regions, this phenomenon has exacerbated saltwater intrusion into freshwater aquifers. This study aims to simulate groundwater flow dynamics in the Qalgachi coastal aquifer and assess the extent of saline water intrusion from an adjacent lake into the aquifer using a solute-transport model.

**Methods:** The groundwater flow system was quantitatively modeled using the Groundwater Modeling System (GMS) software, while the MT3DMS (Mass Transport 3-Dimensional Multi-Species) numerical code was employed to simulate solute transport and evaluate the migration of the saline water front. A solute transport model was calibrated using chloride (Cl<sup>-</sup>) ion concentration data derived from 16 groundwater samples collected across the study area.

**Results:** The transient flow model demonstrated robust performance during calibration and validation, as evidenced by a strong correlation between simulated and observed hydraulic head values, with a root-mean-square error (RMSE) of 1.14 m or less. This confirms the model's reliability for simulating groundwater flow and contaminant transport. Hydraulic analysis revealed a negative water balance, indicating a sustained depletion of aquifer storage.

**Conclusions:** The solute transport model highlights that excessive groundwater abstraction has induced a cone of depression, triggering saline water intrusion from the lake's coastal interface into the aquifer. The encroachment of saline water extends up to 2.3 km inland. In several monitoring wells, electrical conductivity (EC) and chloride concentrations have reached critical levels of 9,700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and 2389 mg/L, respectively, confirming significant contamination due to saltwater intrusion. These findings underscore the urgent need for sustainable groundwater management strategies to mitigate further aquifer degradation.

\*Corresponding Author, E-mail: [nosrataghazadeh@yahoo.com](mailto:nosrataghazadeh@yahoo.com)

**Cite this article:** Aghazadeh, Nosrat, Zokaie, Farzan. (2026). Modeling of groundwater flow of Qalgachi coastal aquifer to evaluate salt water intrusion using GMS. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.505237.1137>.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.505237.1137>

Publisher: Gonbad Kavous University.



## مدل سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان ساحلی قالقاچی برای ارزیابی نفوذ آب شور با استفاده از مدل GMS

نصرت آقازاده<sup>\*</sup>، فرزانه ذکایی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	<b>هدف:</b> افزایش تقاضا برای مصارف آب در چنددهه اخیر، باعث افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی شده است که این امر باعث افت سطح آبهای زیرزمینی و تغییر کیفیت، و در نوار ساحلی باعث نفوذ آب شور به آبخوانهای ساحلی شده است. هدف از این پژوهش، شبیه سازی سیستم جریان آب زیرزمینی آبخوان ساحلی قالقاچی و بررسی پیشروی جبهه شور دریاچه به آبخوان از طریق تهیه مدل کیفی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰	<b>مواد و روشها:</b> برای این منظور، از نرم افزار GMS برای مدل سازی کمی آبخوان و از کد عددی انتقال جرم MT3DMS برای ارزیابی نفوذ جبهه آب شور به آبخوان استفاده شد. تهیه مدل کیفی براساس غلظت یون Cl مربوط به تعداد ۱۶ نمونه آبهای برداشت شده از منطقه مورد مطالعه انجام شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶	<b>نتایج و بحث:</b> بر اساس نتایج به دست آمده از مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل جریان در شرایط ناپایدار و انطباق خوب مقادیر سطح آب محاسباتی و مشاهداتی با RMSE کمتر از ۱/۱۴ متر، مدل تهیه شده از دقت و صحت کافی برای شبیه سازی جریان و استفاده از آن برای تهیه مدل انتقال آلاینده برخوردار است. نتایج حاصل از مدل نشان می دهد که بیلان آبی آبخوان منفی بوده و کاهش در حجم ذخیره آبخوان وجود دارد. براساس نتایج حاصل از مدل کیفی آبخوان، نفوذ آب شور از نوار ساحلی دریاچه به سمت مرکز دشت تا شعاع ۲/۳ کیلومتری اتفاق افتاده و باعث شوری منابع آب زیرزمینی گردیده به طوری که در برخی از چاهها مقادیر EC به ۹۷۰۰ میکروزیمنس و Cl به ۲۳۸۹ میلی گرم بر لیتر رسیده است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵	<b>نتیجه گیری:</b> به دلیل مخروط افتهای ایجاد شده ناشی از پمپاژ بی رویه و افزایش عمق چاههای بهره برداری، نفوذ آب شور از نوار ساحلی دریاچه به سمت مرکز دشت اتفاق افتاده و باعث شوری منابع آب زیرزمینی گردیده است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	
<b>کلیدواژهها:</b> آبخوان، مدل آب زیرزمینی، قالقاچی، نفوذ آب شور، GMS.	

\* نویسنده مسئول، E-mail: [nosrataghazadeh@yahoo.com](mailto:nosrataghazadeh@yahoo.com)

**استناد:** آقازاده، نصرت و ذکائی، فرزانه (۱۴۰۵). مدل سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان ساحلی قالقاچی برای ارزیابی نفوذ آب شور با استفاده از مدل

GMS. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.505237.1137>



## مقدمه

آبخوان‌های ساحلی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین در مناطق ساحلی به‌شمار می‌آیند و نقش کلیدی در توسعه اقتصادی، کشاورزی و تأمین آب شرب ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی، و تغییرات اقلیمی باعث نفوذ آب شور و کاهش کیفیت منابع آب گردیده و دسترسی به آب شیرین را محدود ساخته است. بنابراین، پایش و محافظت از این منابع آسیب‌پذیر امری ضروری است.

نفوذ آب شور به سفره‌های ساحلی، فرایندی هیدرودینامیکی پیچیده‌ای است که به‌دلیل کاهش بار هیدرولیکی آب شیرین به‌علت بهره‌برداری بی‌رویه و حرکت آب شور و آب زیرزمینی که دارای ویژگیها و چگالی متفاوتی هستند، رخ می‌دهد. جبهه نفوذ آب شور به‌عنوان مرزی متشکک و متغیر بین آب شور و شیرین شناخته شده که تحت تأثیر شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی تغییر می‌کند (Hussain et al., 2019). موقعیت و میزان اختلاط آب شور و شیرین، به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به نسبت چگالی آب شور به آب زیرزمینی، تغییر رژیم جریان آب زیرزمینی، میزان تخلیه از آب زیرزمینی و میزان پراکندگی طولی و عرضی اشاره کرد (Mokhtar et al., 2018; Agoubi 2021). از روش‌های ارزیابی میزان نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی می‌توان به روش‌های مدل‌های عددی، روش‌های ژئوفیزیکی، نسبت‌های هیدروشیمیایی و مطالعات ایزوتوپی اشاره کرد (Siarkos and Latinopoulos, 2016; Van et al., 2023).

نحوه حرکت و نوسانات آب زیرزمینی در محیط متخلخل با توجه به خواص محیط اطراف آن یکی از پیچیده‌ترین فرآیندها بوده که حل این مسائل، می‌تواند با شبیه‌سازی جریان با استفاده از روابط ریاضی صورت گیرد (قره محمدلو و شیرزادینا، ۱۴۰۲). مدل‌های آب زیرزمینی ابزار مناسبی برای پایش مداوم کمی و کیفی سفره‌های زیرزمینی هستند. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با مدل‌های ریاضی یک رویکرد غیرمستقیم برای حل مسائل با هزینه کمتر نسبت به روش‌های مستقیم است. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به‌عنوان رویکردی غیر مستقیم، یکی از راه‌های نظارت، کنترل و اعمال مدیریت منابع آب به‌شمار می‌آید (حسین زاده کوهی و اردستانی، ۱۴۰۳). یکی از مناسب‌ترین و کم‌هزینه‌ترین ابزارها برای کنترل و مدیریت نفوذ آب شور، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مدل‌سازی نفوذ آب شور است که این شبیه‌سازی می‌تواند از طریق مدل‌های فیزیکی، عددی و یا ترکیبی از هر دو نوع مدل صورت گیرد (Tabari and Abyar, 2022). بر اساس نتایج مطالعات بدست آمده، روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای مدل‌سازی شوری آب‌های زیرزمینی به‌خصوص در آبخوان‌های ساحلی از کارایی لازم برخوردار بوده و می‌تواند از نتایج ارائه شده توسط این مدل‌ها در مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی این مناطق استفاده نمود (Roy et al., 2025).

اکبرپور و همکاران (۱۴۰۳) اقدام به بررسی دینامیک گذرای پیشروی گوه آب شور دریا در سواحل شنی شیب‌دار توسط مدل آزمایشگاهی و عددی نمودند. نتایج مطالعات نشان دادند که نرخ نسبی تغییرات مساحت گوه در بیشتر زمانها با نرخ نسبی تغییرات پنجه گوه برابر است. لذا شاخص طول پنجه گوه نماینده مناسبی برای بیان میزان حجم آب شور هجوم آورنده به آبخوان ساحلی است. در شرایط گذرا با نوسان سطح آب شیرین آبخوان، میزان پیشروی گوه آب شور در شیب‌های تندتر بیشتر از شیب‌های کمتر است. مدل‌های عددی و کیفی امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات مکانی و زمانی را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها با ارائه پیش‌بینی‌های دقیق از رفتار سیستم آبخوان در شرایط مختلف، می‌توانند در طراحی استراتژی‌های مدیریتی مؤثر و پایدار به‌کار گرفته شوند (Basack et al., 2022). بررسی پیشینه مطالعات انجام شده در خصوص ارزیابی نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی کمی و کیفی جریان آب زیرزمینی و بررسی نفوذ جبهه آب شور می‌توان از مدل‌های عددی مانند MODFLOW, SEAWAT, FEMWATER و T3DMS و نیز از داده‌های سنجش از دور، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یادگیری ماشین در کنار مدل‌سازی عددی استفاده کرد (Sherif et al., 2012; Park et al., 2012; Gopinath et al., 2016; Huang et al., 2018; Akhtar et al., 2022). همچنین روش‌های شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد (قوامی و محمدی، ۱۴۰۴). در مدل‌های عددی برای حل معادلات از روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود استفاده می‌شود. این روش‌ها برای ارزیابی جریان‌های

پیچیده زیرزمینی و عکس‌العمل سفره‌های ناهمگن، ناهمسان و ناپایدار با چاه‌های پمپاژ متعدد و شرایط مرزی پیچیده به کار گرفته می‌شوند. یکی از پرکاربردترین مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده‌ها، مدل GMS و کد MODFLOW است که در آنها از این روش‌ها برای حل معادلات استفاده شده است. پژوهش‌های انجام شده توسط محققین مختلف نشان از دقت و صحت بالای این مدل دارد (عزیزی، اصغری مقدم و ناظمی، ۱۳۹۸). در سال‌های اخیر، هجوم آب شور به آبخوان‌های ساحلی واقع در حاشیه خلیج فارس، دریای عمان، دریای خزر و دریاچه ارومیه باعث شده تحقیقات مختلفی در خصوص مدل‌سازی کمی و کیفی نفوذ آب شور در کشور صورت گیرد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات انجام شده در آبخوان‌های ساحلی کشور مهمترین عوامل موثر بر نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، کاهش تغذیه آبخوان و تغییرات اقلیمی می‌باشند (ده مرده و همکاران، ۱۴۰۳). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صابری مهر، اصغری مقدم و ندیری (۱۳۹۶) در آبخوان دشت شبستر، تراکم چاه‌های بهره‌برداری و افت شدید سطح آب زیرزمینی باعث شده شورابه‌های ذخیره‌شده در میان رسوبات انتهایی دشت به سمت چاه‌های بهره‌برداری جریان یافته و آب این مناطق شور گردد. در برخی از آبخوان‌های ساحلی، وجود رسوبات دانه‌ریز با نفوذپذیری پایین ممکن است مانع از گسترش جبهه آب شور در آبخوان گردد. در بررسی پتانسیل نفوذ آب شور به آبخوان ارومیه با استفاده از مدل‌های عددی که توسط امیری (۱۳۹۹) صورت گرفته، نرخ نفوذپذیری بسیار پایین رسوبات در بخش‌های ساحلی و همچنین بار هیدرولیکی زیاد آب زیرزمینی موانع جدی برای نفوذ آب شور به درون آبخوان منطقه مورد مطالعه شده است. دشت قالقاچی در غرب دریاچه ارومیه واقع شده که در سال‌های اخیر به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و نیز کاهش بارندگی، سطح آب زیرزمینی با افت زیادی مواجه شده است. این عامل باعث هجوم آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان و تغییرات کیفی آب چاه‌های بهره‌برداری منطقه شده است. هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار GMS و همچنین تهیه مدل کیفی به‌منظور بررسی میزان پیش‌روی و نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی منطقه مورد مطالعه است.

## مواد و روش‌ها

دشت قالقاچی، به فاصله تقریبی ۷۲ کیلومتری در شمال شرقی شهرستان ارومیه و در غرب دریاچه ارومیه واقع شده است. این دشت، از سه جهت، توسط سازندهای زمین شناسی احاطه شده و تنها از قسمت خروجی به دریاچه ارومیه منتهی می‌گردد (شکل ۱). حوضه آبریز میان دشت قالقاچی با مساحت حدود ۶۵ کیلومتر مربع فاقد رودخانه دائمی بوده و رواناب‌های سطحی منطقه توسط یک مسیل اصلی که در سرتاسر طول دشت کشیده شده بعد از تغذیه مخروط افکنه قالقاچی به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شوند. ارتفاعات حاشیه دشت قالقاچی عمدتاً از سنگ‌های آذرین درونی (گرانیت)، دیاباز و آهک تشکیل شده است (شکل ۱).

در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی و تهیه مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان ساحلی منطقه مورد مطالعه، از نرم‌افزار GMS استفاده شد. به‌منظور تهیه و اجرای مدل، ابتدا مدل مفهومی آبخوان با استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود تهیه و سپس بر اساس نتایج به‌دست آمده، پس از تنظیم و آماده‌سازی اطلاعات مربوط به هر لایه در GIS و ذخیره با فرمت shp برای وارد کردن به GMS، لایه‌های اطلاعاتی در مدل مفهومی ساخته شده و به مدل عددی منتقل گردید.

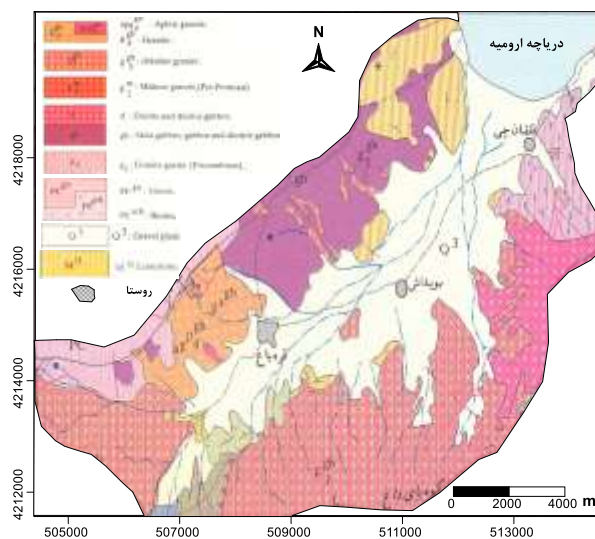
شبکه‌بندی مدل به سلول‌های با ابعاد  $160 \times 160$  متر انجام گرفت. ارتفاع سنگ کف آبخوان با استفاده از اطلاعات ژئوفیزیکی و لوگ چاه‌های حفاری، و داده‌های سطح آبخوان با استفاده نقشه‌های توپوگرافی و فایل DEM<sup>۱</sup> به‌دست آمد. ضخامت زون اشباع و رسوبات آبرفتی در دشت، با توجه به نتایج مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان و لوگ چاه‌های بهره‌برداری تعیین شد. براساس نقشه‌های تراز آب زیرزمینی، مقاطع ورودی و خروجی سیستم جریان آب زیرزمینی تعیین و بر اساس آن شرایط مرزی وارد مدل گردید. بار اولیه هیدرولیکی در محدوده مورد مطالعه بر پایه نقشه خطوط هم تراز آب زیرزمینی برای محدوده مدل و سال آبی ۹۰-۹۱ محاسبه و به مدل وارد شد. در پارامترهای ورودی مدل، بر اساس داده‌های سازمان آب منطقه‌ای و گزارش ارزیابی آبخوان دشت، میزان نفوذ از بارش ۱۵ درصد و میزان آب برگشتی کشاورزی با توجه به کاربری اراضی، نوع کشت محصولات کشاورزی

<sup>۱</sup>. Digital Elevation Model

و بافت خاک ۳۵ درصد لحاظ گردید. هدایت هیدرولیکی آبخوان، با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمایش پمپاژ و مقاومت عرضی لایه آبدار بر اساس نتایج ژئوفیزیکی انجام شده در دشت که توسط سازمان آب منطقه‌ای استان صورت گرفته بود، استفاده شد. برای تعمیم اطلاعات نقطه‌ای به کل محدوده، از مدل درون‌یابی کریجینگ بی‌زین موجود در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. برای تعمیم نتایج به سلول‌های شبکه مدل، با رسم واریوگرام تجربی، از توابع درون‌یابی موجود در مدل GIS و بسته‌های موجود در آن استفاده شد. مدل کمی با استفاده از داده‌های اولیه، شرایط مرزی آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری، موقعیت و تراز آب پیزومترها (چاه‌های مشاهده‌ای)، هدایت هیدرولیکی، مقدار بارش، ضریب آبدهی ویژه، جریان آب زیرزمینی ورودی و خروجی از آبخوان و خصوصیات فیزیکی آبخوان (تراز سنگ کف، تراز سطح زمین و سطح ایستابی به مدل عددی در ماژول سه‌بعدی شبکه تبدیل شد. برای این منظور، ابتدا مدل جریان در حالت ماندگار (یک دوره تنش یک ماهه مهر ۱۳۹۰) و سپس برای شرایط ناپایدار طی ۱۲ دوره تنش (۱۲ ماهه از مهر ۱۳۹۰ تا مهر ۱۳۹۱) اجرا و کالیبره شد. در این مطالعه برای واسنجی مدل از دو فرایند سعی و خطا و خودکار موجود در اینترفاز GIS استفاده شد.

بعد از کالیبراسیون، صحت‌سنجی مدل صورت گرفته و سناریوهای مختلف برای شرایط آبخوان در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مدل به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی، نقشه‌های تراز و افت سطح آب، بیلان و غیره تهیه گردید. در این پژوهش به منظور بررسی نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان و مدل‌سازی جبهه نفوذ آب شور، با توجه به عدم وجود اطلاعات و داده‌های کیفی از نفوذ آب شور به آبخوان در منطقه مورد مطالعه، بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه و بر اساس شواهد میدانی، تعداد ۱۶ نمونه از منابع آب زیرزمینی انتخابی مربوط به چاه‌های بهره‌برداری در تیر ماه ۱۳۹۸ صورت گرفت. پارامترهای EC و pH با استفاده از دستگاه پرتابل WTW در سر چاه اندازه‌گیری شد (جدول ۱). به منظور نمونه‌برداری از منابع آب انتخابی، پس از سپری شدن بیش از ۱۰ دقیقه از شروع پمپاژ چاه، نمونه‌برداری انجام شد. برای این منظور ابتدا ظروف نمونه‌برداری توسط آب منبع ۳ بار شست‌وشو داده شده و سپس نمونه‌ها در ظرف پلی اتیلن ۲۵۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری و به آزمایشگاه انتقال داده شد. در این مطالعه از یون آلانین کلر به عنوان شاخص نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان استفاده شد. برای این منظور نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال و در آن برای اندازه‌گیری غلظت یون کلر در نمونه‌ها، از روش تیتراسیون استفاده شد.

به منظور تهیه مدل کیفی، ابتدا اطلاعات مورد نیاز مدل شامل تخلخل و ضریب قابلیت پراکندگی آبخوان تعیین و سپس بر اساس نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌ها، با استفاده از مدل انتقال MT3DMS در نرم‌افزار GIS، مدل کیفی تغییرات غلظت CI به عنوان یک نوع از آلاینده‌های امتزاج‌پذیر در آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن فرایندهای همرفت، پراکندگی و واکنش‌های شیمیایی برای ارزیابی نفوذ آب شور به آبخوان تهیه گردید و بر اساس آن تغییرات کیفی و مناطق بحرانی تعیین شد.



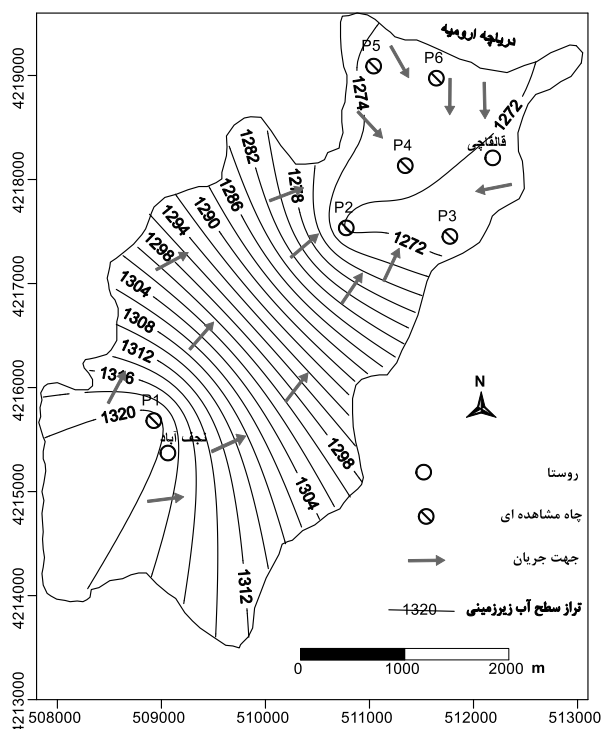
شکل ۱- نقشه موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

## نتایج و بحث

## بررسی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان

میان‌دشت قالقاچی دارای وسعت ۱۹ کیلومتر مربع بوده که از این وسعت، ۱۵ کیلومترمربع آن زیر پوشش شبکه پیزومتری سازمان آب منطقه‌ای است. بر اساس آمار و اطلاعات و مدل مفهومی تهیه شده از آبخوان، سفره آب زیرزمینی دشت از نوع آزاد است. در این دشت حداکثر ضخامت رسوبات آبرفتی ۱۱۰ متر و متوسط آن، ۵۲ متر با ضریب قابلیت انتقالی بین ۱۵۰ تا ۱۰۰ متر مربع در روز است. آبخوان آبرفتی دشت به شکل کاسه‌ای است که گودی آن در بخش مرکزی دشت واقع شده و به سمت شمال و جنوب از ضخامت آن کاسته می‌شود. متوسط عمق سطح ایستابی در ورودی‌های دشت، ۴۵ متر و در بخش‌های میانی ۲۵ متر و در خروجی‌های دشت ۱۰ متر از سطح زمین است. جهت جریان با توجه به شیب عمومی دشت، از جنوب غرب به شمال شرق با گرادیان هیدرولیکی به طور متوسط ۱۳ در هزار از سه جبهه ورودی دشت تا ۴/۵ در هزار در خروجی دشت کاهش می‌یابد (شکل ۲).

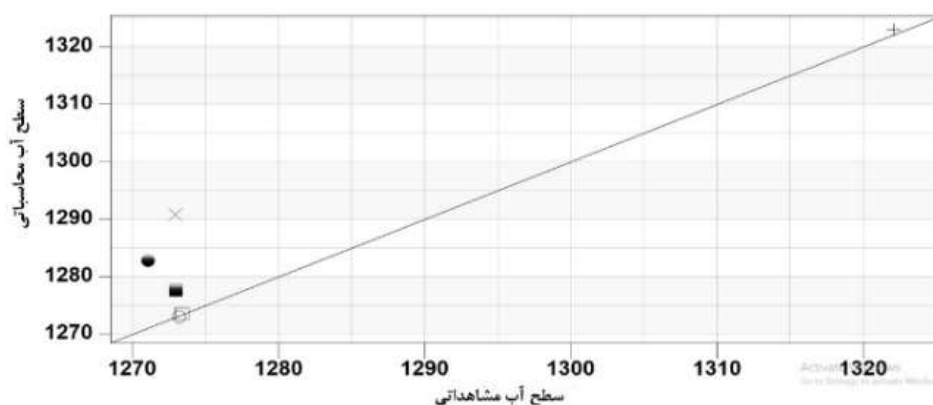
بر اساس آماربرداری صورت‌گرفته (سال آبی ۹۱-۹۰)، تعداد چاه‌های بهره‌برداری منطقه، ۱۸ حلقه با تخلیه سالانه ۲/۵۴ میلیون مترمکعب، ۲ رشته قنات با تخلیه ۰/۰۷۸ میلیون مترمکعب است. بررسی هیدروگراف واحد دشت نشان می‌دهد که در بیست سال اخیر به‌طور متوسط سالانه ۱/۸۲ متر سطح آب زیرزمینی افت کرده است. با توجه به حفاری‌های انجام‌شده در دشت و بر اساس آمار سازمان آب منطقه‌ای، متوسط عمق چاه‌ها در قسمت‌های ورودی این دشت برابر ۷۰ متر بوده که تا سنگ کف مارنی حفاری شده است. در بخش‌های ساحلی و به سمت بخش میانی دشت و بستگی به دوری و نزدیکی از ساحل، به علت نفوذ آب شور دریاچه، به‌طور متوسط آب قابل مصرف از عمق ۱۵ متری شروع شده و در قسمت‌های میانی حداکثر تا عمق ۴۵ متری آب قابل مصرف کشاورزی برداشت می‌شود (سازمان آب منطقه‌ای، ۱۳۹۰).



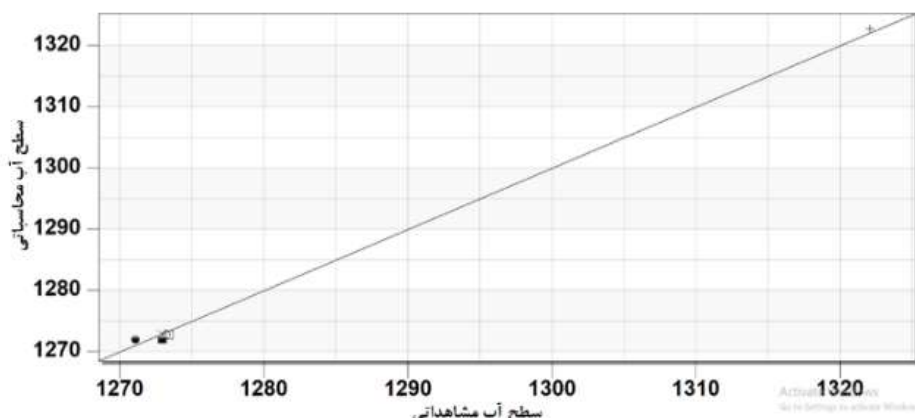
شکل ۲- نقشه تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

### شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در شرایط پایدار و ناپایدار

نتایج حاصل از اولین اجرای مدل شبیه‌سازی سیستم جریان آب زیرزمینی برای شرایط پایدار نشان داد که اختلاف بین بار مشاهداتی و محاسباتی بیش از حداکثر مقدار مجاز خطا است. بر اساس اجرای اولیه مدل در حالت پایدار، نتایج مدل نشان می‌دهد که اختلاف بار هیدرولیکی بین محاسباتی و مشاهده‌ای در ۵۰٪ چاه‌های مشاهده‌ای و در قسمت‌های میانی دشت بیش از ۱۰٪ است (شکل ۳). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین خطا برابر  $8/825-$ ، میانگین خطای مطلق برابر  $8/8$ ، و ریشه میانگین مربع خطا برابر  $13/48$  است که با در نظر گرفتن مقدار مجاز اختلاف بین سطح ایستابی مشاهداتی و محاسباتی ( $1/5$  متر) مقدار عددی مربوط به این خطا بسیار زیاد بوده و بایستی به کمتر از مقدار مجاز برسد. بنابراین مدل اولیه اجرا شده نمی‌تواند شرایط واقعی سیستم جریان آب زیرزمینی محدود مورد مطالعه را نشان دهد. لذا لازم است واسنجی مدل برای پارامترهای دارای عدم قطعیت انجام شود. فرآیند واسنجی به‌منظور کاهش خطا و تطابق منطقی‌تر بین سطح آب شبیه‌سازی شده و سطح آب واقعی در چاه‌های مشاهده‌ای بیشتر بر اساس پارامترهای هدایت هیدرولیکی و عمق سنگ کف صورت گرفت. در شکل (۴) نمودار مقایسه‌ای مقادیر بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی بعد از واسنجی و در جدول (۱) تفاضل سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسباتی بعد از واسنجی مدل نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصله، با واسنجی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و عمق سنگ کف خطای مجذور میانگین مربع به کمتر از ۱ متر کاهش یافت که این خطا در محدوده خطای مجاز بوده و این بهبود با نتایج Le و همکاران (۲۰۱۹) که در آن تحقیق با واسنجی پارامترهای مورد اشاره، خطای RMSE را از ۱۰ متر به  $0/8$  متر رساندند، همسو است. به‌منظور ساخت مدل ناپایدار، از مدل پایدار که اجرا و واسنجی شده بود، استفاده گردید. مدل ناپایدار شامل یک دوره زمانی یکساله (۱۲ گام زمانی) از آبان ۹۰ تا مهر ۹۱ در نظر گرفته شد. شکل (۵) اختلاف بیش از حد مجاز سطح ایستابی محاسباتی و مشاهداتی یکی از اولین اجراهای مدل در شرایط ناپایدار را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، خطاهای موجود و به‌خصوص خطای RMSE در محدوده قابل قبول نبوده و بایستی واسنجی مدل برای حالت ناپایدار صورت گیرد.



شکل ۳- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی قبل از واسنجی برای حالت پایدار



شکل ۴-برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی بعد از واسنجی برای حالت پایدار

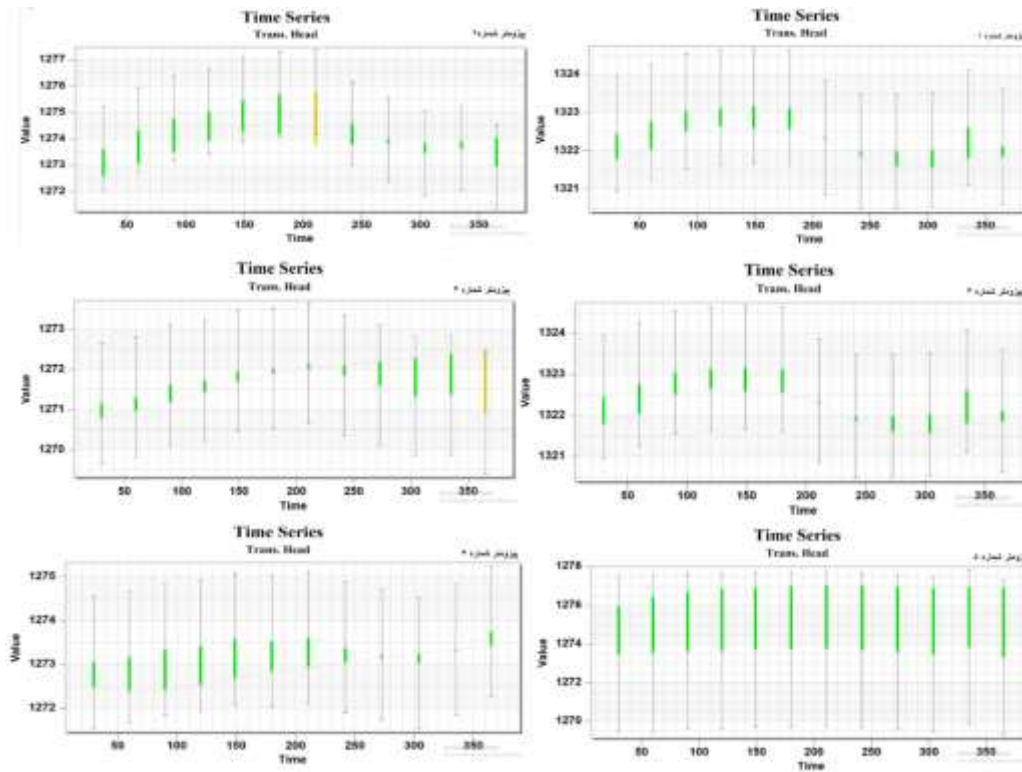
جدول ۱-تفاضل سطح آب اندازه گیری شده و محاسباتی بعد از واسنجی در حالت پایدار

شماره	نام	سطح آب مشاهداتی	سطح آب محاسباتی	اختلاف سطح آب
۱	S1	۱۳۲۲/۰۹	۱۳۲۲/۷۱	-۰/۶۲
۲	S2	۱۲۷۲/۹۳	۱۲۷۲/۸۷۸	-۰/۰۵۲
۳	S3	۱۲۷۳/۱۹	۱۲۷۲/۸۶۳	-۰/۳۲۷
۴	S4	۱۲۷۱/۰۶	۱۲۷۱/۹۹۷	-۰/۹۳۷
۵	S5	۱۲۷۳/۴۱	۱۲۷۲/۷۸۱	-۰/۶۴۹
۶	S6	۱۲۷۲/۹۷	۱۲۷۱/۹۸۸	-۰/۹۸۲

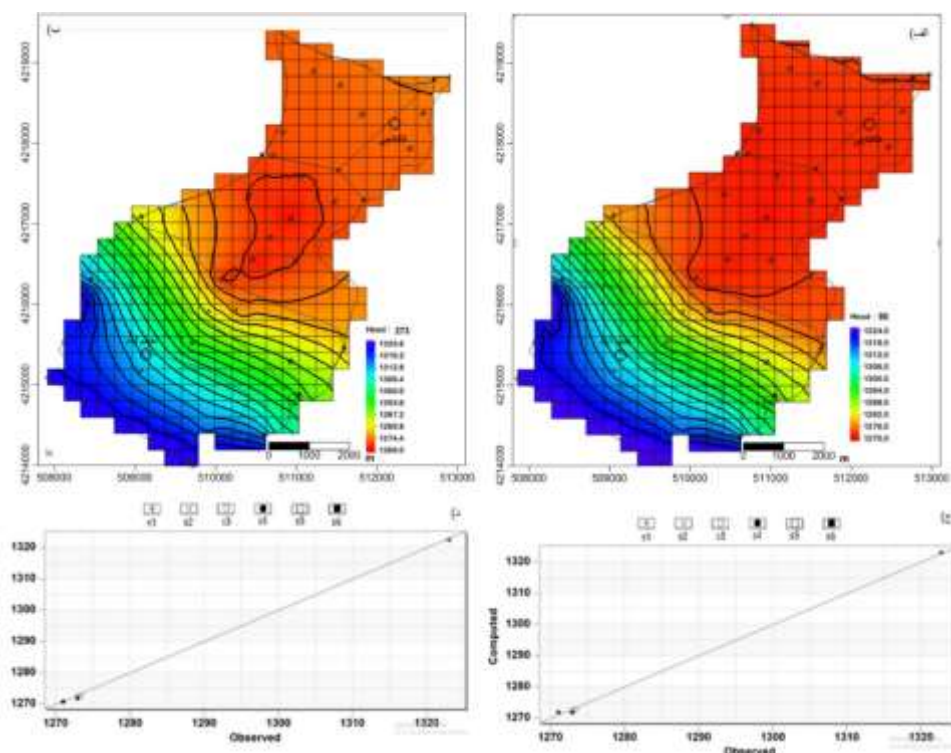
#### واسنجی و صحت سنجی مدل جریان در شرایط ناپایدار

در حالت ناپایدار به منظور واسنجی مدل و رفع خطا، هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی مربوط به پیزومترهای منطقه مورد مطالعه طی ۱۲ استرس پیروود موجود، مورد بررسی قرار گرفت و سپس برای از بین بردن خطاهای مدل، پارامترهای مختلفی از جمله آبدهی ویژه طی فرایند واسنجی تغییر داده شد. به دلیل اینکه هدایت هیدرولیکی قبلا در حالت پایدار کالیبره شده بود؛ لذا در این مرحله ثابت باقی ماند. مرحله واسنجی پارامترها تا زمانی ادامه داده شد تا هیدروگراف بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در بازه مجاز واقع شود و نیز خطای RMSE کمتر از مقدار خطای در نظر گرفته شده (۱/۵ متر) باشد. بعد از واسنجی مدل و بهینه‌سازی ضریب آبدهی ویژه، مشاهده گردید که اختلاف سطح ایستابی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در حد قابل قبول بوده و مقادیر خطای میانگین (ME) ۰/۲، خطای میانگین مطلق (MAE) ۱/۰۱ و خطای مجذور میانگین مربع (RMSE) ۱/۱۴ بوده که این خطاها در محدوده مجاز قرار دارند. مقایسه نتایج بدست آمده از واسنجی مدل با بهینه‌سازی برخی پارامترها با یافته‌های تحقیق صورت گرفته توسط (Sharan et al., 2024) مطابقت دارد. نتایج مطالعات Kihm و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که برای افزایش دقت زیاد مدل می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. بنابراین استفاده از روش‌های مختلف از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند خطای مدل را خیلی کاهش دهد. صحت مدل در مرحله‌ای غیر از مرحله کالیبراسیون و بهینه‌سازی در یک دوره تنش متغیوت (سال آبی ۹۲-۹۱) اجرا شد و نتایج با مشاهدات صحرائی منطقه مقایسه گردید. هیدروگراف تراز آب مشاهداتی و محاسباتی و همچنین نمودار توزیع مقادیر محاسباتی در برابر مشاهداتی برای چاه‌های مشاهده‌ای در دوره‌های تنش متغیوت ارزیابی شد. در شکل (۶) تراز آب

زیرزمینی محاسباتی و نمودار توزیع مقادیر محاسباتی در برابر مشاهداتی در دوره تنش اول (۹۰ روزه) و دوره سوم (۲۷۳ روز) نشان داده شده است. نتایج اجرای مدل در دوره صحت‌سنجی نشان می‌دهد که بین روند تغییرات تراز آب مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه‌شده همخوانی قابل قبولی وجود دارد و در محدوده خطای قابل قبول شبیه‌سازی  $\pm 1/3$  قرار گرفته است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل مورد نظر می‌تواند نوسانات سطح آب زیرزمینی را با توجه به تغذیه و تخلیه‌های صورت گرفته در دوره‌های مختلف برای آبخوان دشت قالقاچی به درستی پیش‌بینی کند.



شکل ۵- هیدروگراف تراز آب محاسباتی در برابر مشاهداتی در حالت ناپایدار برای چاه‌های مشاهداتی



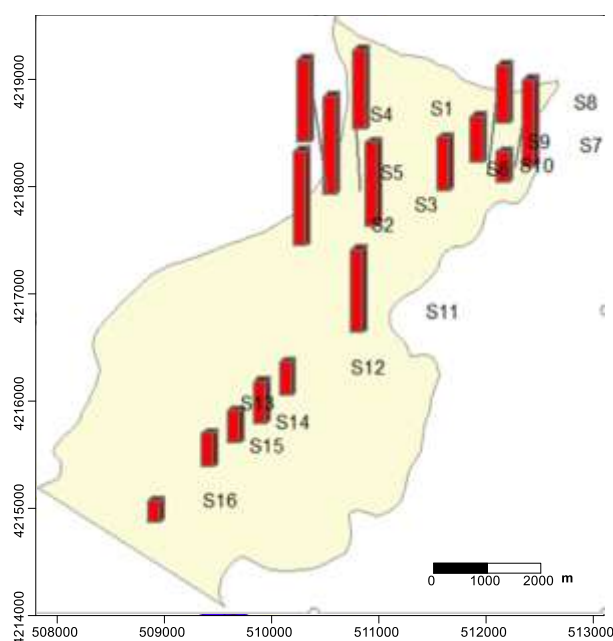
شکل ۶- تراز آب زیرزمینی محاسباتی (الف- دوره تنش اول، ب- دوره تنش سوم) و نمودار توزیع مقادیر محاسباتی در برابر مشاهداتی در دوره صحت سنجی (ج- دوره تنش اول، د) دوره تنش سوم

#### ارزیابی نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه به منظور بررسی وضعیت کیفی آب زیرزمینی از ۱۶ حلقه چاه بهره‌برداری نمونه‌برداری انجام شد و نمونه‌ها در آزمایشگاه اداره کل محیط زیست استان آذربایجان غربی آنالیز شد. همچنین برای بررسی کیفی، تعیین تیپ آب و فرایندهای هیدروژئوشیمیایی غالب، از اطلاعات و داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد (آقازاده، اصغری مقدم و صمدی، ۱۳۹۱). بر اساس نتایج حاصل از نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه، میزان شوری (EC) بین ۴۱۰ تا ۹۷۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر تغییر می‌کند. حداکثر مقدار آن مربوط به بخش میانی دشت و قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه است. حداقل مقدار آن در ورودی دشت است و میانگین آن برای کل منطقه برابر  $۳۲۵۷/۰۶$  میکروموس بر سانتی‌متر بوده و مقادیر pH در نمونه‌ها از  $۶/۸$  تا  $۸/۳$  است. شکل (۷) نمودار میله‌ای EC برای هر یک از چاه‌های کیفی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج آنالیز نمونه‌های کیفی برداشت‌شده از چاه‌های بهره‌برداری منطقه مورد مطالعه

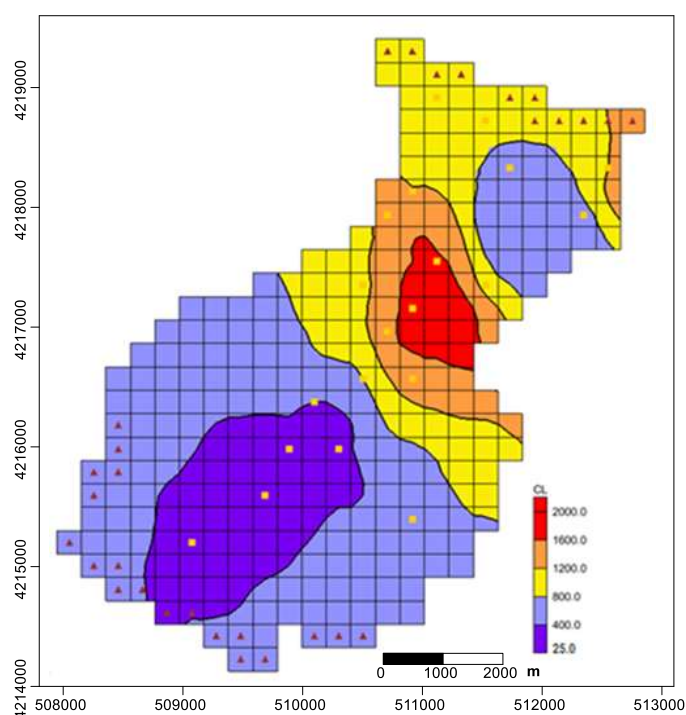
نمونه	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	شوری	pH	$\text{Na}^+$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)
S1	۴۵۹۰	۲/۵۹	۶/۹	۳۵۹	۱۰۸۶
S2	۳۳۹۰	۱/۹	۷/۱	۳۴۶	۹۵۱
S3	۷۲۱۰	۴/۰۹	۶/۸	۴۴۰	۱۷۸۹
S4	۷۹۷۰	۴/۵۴	۶/۹	۵۷۰	۱۹۶۳
S5	۳۳۰۰	۱/۸۵	۷/۶	۵۱۲	۹۶۲
S6	۹۵۲	۰/۵۳	۸/۳	۹۳	۱۴۹
S7	۷۹۵۰	۴/۵۲	۶/۹	۵۸۵	۲۰۳۸
S8	۱۷۰۱	۰/۹۵	۷/۶	۱۵۴	۲۹۱
S9	۱۵۳۰	۰/۸۵	۷/۴	۹۳	۲۰۹
S10	۵۹۰	۰/۳۳	۷/۸	۳۶	۵۳
S11	۹۷۰۰	۵/۵۵	۷/۳	۵۵۵	۲۳۸۹
S12	۶۸۰	۰/۳۸	۷/۳	۴۳	۶۷
S13	۶۳۰	۰/۳۵	۷/۹	۴۷	۷۸
S14	۷۵۰	۰/۴۲	۷/۵	۶۵	۷۱
S15	۷۶۰	۰/۴۲	۷/۳	۶۶	۷۵
S16	۴۱۰	۰/۲۳	۷/۷	۲۰	۲۵



شکل ۷- نمودار میله‌ای مقادیر EC مربوط به نمونه‌های کیفی

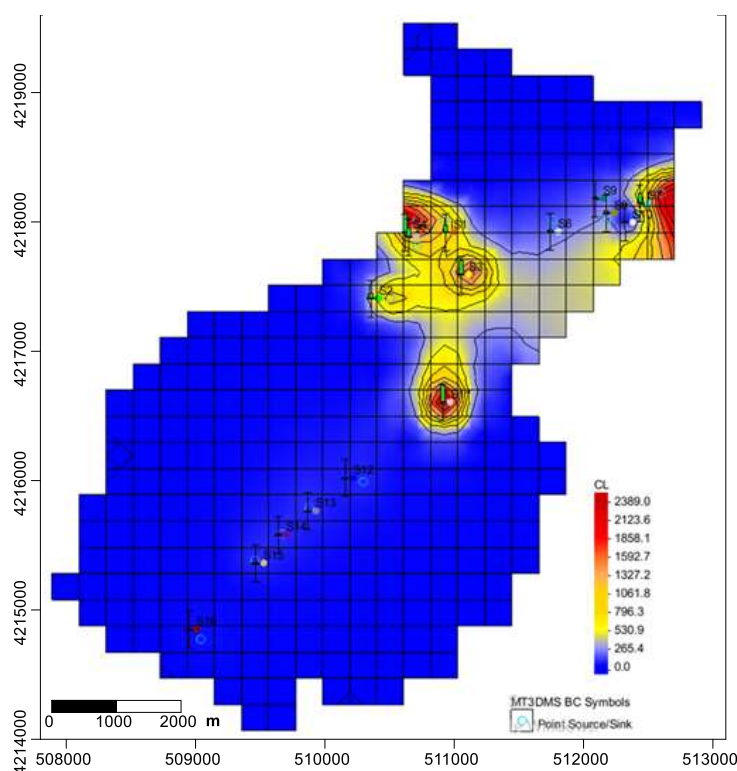
بررسی‌ها نشان می‌دهد که توالی آنیونی و کاتیونی به ترتیب  $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$  ,  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$  بوده و سه گروه تیپ آب وجود دارد که این نتایج با یافته‌های مطالعات قبلی آقازاده، اصغری مقدم و صمدی، (۱۳۹۱) در همان منطقه همخوانی دارد. آب‌های منطقه تغذیه عمدتاً کربناته کلسیک ( $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ ) و بخش‌های میانی دشت که کمتر تحت تاثیر نفوذ آب شور قرار گرفته‌اند دارای تیپ کلرو کلسیک ( $\text{Ca} - \text{Cl}$ ) هستند. مناطقی که دارای این تیپ آب هستند نشان‌دهنده حاشیه زون آلودگی در اثر نفوذ آب شور بوده که این نتایج با یافته‌های به‌دست‌آمده از مطالعات Wurl و همکاران (2023) مطابقت دارد. تیپ آبهای زیرزمینی

منطقه مور مطالعه، بدون گذر از حالت سولفات و بدون تبعیت از توالی آنیونی چیبوتارو(توالی آنیونی به ترتیب بیکربنات، سولفات و کلروه از منطقه تغذیه به طرف منطقه تخلیه آب زرمینی) تبدیل به کلروه شده و هرچه به نوار ساحلی نزدیک تر می شویم تیپ آب کلروه سدیک (Na-Cl) می گردد. این الگو نشان دهنده تغییر شیمیایی کیفیت آب در اثر واکنش تعویض یونی به علت نفوذ آب شور و اختلاط آب شور و شیرین است که این شرایط، مشابه نتایج بررسی های صورت گرفته در آبخوان های ساحلی تحت تاثیر آب شور بوده و همچنین مقایسه گسترش نفوذ آب شور در منطقه مورد مطالعه با سایر مناطق نشان می دهد که ایجاد مخروط افتهای شدیدتر و افزایش عمق چاهها در این منطقه، به گسترش زیاد نفوذ آب شور باعث شده است (Wurl et al., 2023). در این تحقیق از یون آلایند کلر به عنوان شاخص نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان استفاده شد. بر اساس نتایج آنالیز کیفی آزمایشگاهی نمونه های صحرایی برداشت شده، میزان یون کلر در منابع آب زیرزمینی منطقه بین ۲۵ تا ۲۳۸۹ میلی گرم بر لیتر تغییر می کند (جدول ۱). بررسی ها نشان می دهد که بیشترین مقدار کلر مربوط به قسمت شمالی دشت و در فاصله حدود ۵۰۰ متری حاشیه دریاچه ارومیه و مربوط به نمونه S7 است که زیاد بودن غلظت این یون در ترکیب آب نمونه، به دلیل نفوذ آب شور دریاچه است. کمترین مقدار کلر مربوط به ورودی دشت بوده و میانگین آن برای کل منطقه ۷۶۲/۲۵ میلی گرم بر لیتر است. بر اساس میزان کلر موجود در نمونه ها، تا شعاع ۲/۳ کیلومتری نوار ساحلی نفوذ آب شور رخ داده به طوری که در نمونه S11 که در فاصله حدودا ۲ کیلومتری از نوار ساحلی واقع شده، مقدار کلر به ۱۹۷۴ میلی گرم بر لیتر رسیده است (شکل ۸). مقایسه نتایج آنالیز کلر در منابع آب زیرزمینی نزدیک ساحل با نمونه های شاهد (قنات و در آب زیرزمینی بالادست آبخوان) که تحت تاثیر نفوذ آب شور دریا قرار نگرفته است، نشان می دهد که با نفوذ آب شور دریا به آبخوان، مقدار یون کلر در نمونه های نزدیک ساحل افزایش پیدا کرده است. این افزایش باعث غیر قابل استفاده شدن آن برای مصارف شرب و کشاورزی شده است. در قنات هایی که در بالادست قرار دارند و تحت تاثیر پیشروی آب شور دریا نیستند، میزان یون کلر در حد استاندارد بوده و آب سالم و قابل شربی دارند.



شکل ۸- نقشه پهنه بندی مقادیر کلر نمونه های کیفی

به منظور تهیه و اجرای مدل کیفی، شیپ فایل مربوط به چاه‌های کیفی در GIS تهیه و سپس با استفاده از کد عددی MT3DMS چاه‌های کیفی تعریف مدل گردیده و مدل کیفی ساخته شد. در مدل کیفی یون کلر به عنوان شاخص شوری و آلودگی تعریف مدل شد. بر اساس نتایج به دست آمده از لوگ چاه‌ها منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود از جنس رسوبات آبرفتی و دانه‌بندی آنها، تخلخل به طور متوسط ۳۸ درصد، ضریب پخشیدگی طولی با فرض ثابت بودن دبی و شیب طولی نسبت به فاصله از محل ورود آلودگی ۲۰ تا ۳۰ متر در نظر گرفته شد. نسبت پخشیدگی عرضی و عمودی به پخش طولی نیز وارد مدل شد و در نهایت مدل اجرا گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از خروجی مدل کیفی، مشاهده می‌شود که به دلیل مخروط‌افته‌های ایجاد شده ناشی از پمپاژ بی‌رویه و عمق زیاد چاه‌ها، نفوذ آب شور از نوار ساحلی دریاچه به سمت مرکز دشت اتفاق افتاده است. لذا نفوذ آب شور دریاچه ارومیه، منشأ اصلی غلظت زیاد کلر در دشت قالقاچی و بخصوص در بخش‌های نزدیک حاشیه دریاچه و در برخی از نواحی مرکزی دشت است (شکل ۹).



شکل ۹- غلظت شبیه‌سازی شده کلر در منطقه مورد مطالعه

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل جریان در شرایط ناپایدار و انطباق خوب بین مقادیر سطح آب محاسباتی و مشاهداتی با خطای مربع میانگین مجذور (RMSE) کمتر از ۱/۱۴ متر، مدل تهیه شده از دقت و قابلیت اطمینان کافی برای شبیه‌سازی جریان و استفاده در مدل‌سازی انتقال آلاینده برخوردار است. تحلیل نتایج مدل جریان نشان داد که بیلان آبی طی دوره یکساله شبیه‌سازی شده منفی بوده که حاکی از افت حجم ذخیره آبخوان است. از سوی دیگر، نتایج مدل کیفی و پهنه‌بندی غلظت کلراید نشان می‌دهد که مخروط‌افت ناشی از پمپاژ بی‌رویه و عمق زیاد چاه‌های بهره‌بردار، موجب نفوذ آب شور از نوار ساحلی دریاچه به سمت مرکز دشت شده است. افت زیاد سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه، توازن هیدرولوژیکی دشت قالقاچی مختل کرده و نفوذ آب شور دریاچه ارومیه

<sup>1</sup> Shapefile

تا شعاع ۲ کیلومتری از خط ساحل را تسریع نموده است. به طوری که هدایت الکتریکی (EC) به ۹۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر و غلظت کلرید (Cl<sup>-</sup>) به ۲۳۸۹ میلی گرم بر لیتر رسیده است. لذا پیشنهاد می شود با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، به منظور تقویت و تجدید منابع آب زیرزمینی از روش هایی از قبیل کاهش بهره برداری از آبخوان بویژه در نواحی نزدیک ساحل و تغذیه مصنوعی استفاده شود.

## ملاحظات اخلاقی

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تهیه، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج مفهوم سازی، ارزیابی تحلیل های نرم افزاری/آماري، نویسنده دوم: نمونه برداری، تهیه داده ها، و انجام تحلیل های نرم افزاری آماري

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

### سپاسگزاری

در این تحقیق از داده های کمی و کیفی موجود در آرشیو سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان غربی برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شده است؛ لذا از مسئولان محترم این سازمان، به خصوص از کارشناس دشت و مدیر محترم آب زیرزمینی سازمان، تقدیر و تشکر به عمل می آید.

### دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### منابع

- آقازاده، ن.، اصغری مقدم، ا.، صمدی، ن. ۱۳۹۱. ارزیابی نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به آب خوان ساحلی میان دشت قالچاقی، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۷(۴)، ۲۵-۴۶.
- امیری، و. ۱۳۹۹. بررسی پتانسیل نفوذ شورابه به منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان ساحلی ارومیه)، مخاطرات محیط طبیعی، ۹(۲۶)، ۱۸۴-۱۶۱.
- اکبرپور، ا.، عزیزی، م.، نجفی مود، م. ح.، رضاپور، ع. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی و عددی پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی شنی شیبدار در شرایط گذرا. نشریه علمی هیدرولیک، ۲۰(۱)، ۱۸-۱.
- حسین زاده کوهی، ح.، اردستانی، م. ۱۴۰۳. مدل سازی و بررسی وضعیت کمی آب های زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان با استفاده از مدل MODFLOW. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۱)، ۱۷-۱.
- ده مرده، ا.، حشمت پور، ع.، فتح آبادی، ا.، جندقی، ن. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر خشکسالی و ترسالی بر کیفیت و کمیت آب زیر زمینی شهرستان کلالة رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست. Doi: 10.22034/nawee.2024.460310.1084 e209385
- سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان غربی. ۱۳۹۰. بررسی منابع آب زیرزمینی دشت قالچاقی. دفتر مطالعات پایه منابع آب.

- صابری مهر، ص.، اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع. ا. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت شبستر با استفاده از نرم‌افزار GMS. دو فصلنامه کواترنری ایران، ۳(۱)، ۴۱-۵۰.
- عزیزی، ف.، اصغری مقدم، ا.، ناظمی، ا. ح. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان دشت ملکان. علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، ۱۳(۴۵)، ۳۲-۴۳.
- قره محمودلو، م.، شیرزادینیا، ج. ۱۴۰۲. ارزیابی و مقایسه کیفیت منابع آبی چشمه و چاه از نظر قابلیت شرب و آبیاری (مطالعه موردی: شرق دشت گرگان). رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۲(۱)، ۴۷-۶۶.
- قوامی سید مرسل، م. ش. ۱۴۰۴. پایش کیفیت آبهای زیرزمینی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، منطقه مورد مطالعه: شهرستان قروه و دهگلان. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست.
- Aghazadeh, N., Asghri Mogaddam, A., Samadi, N. 2010. Evaluation of seawater intrusion of Urmia Lake into the Ghalghache costal aquifer. *Journal of water and soil conservation*, 17(4), 25-46 (In Persian).
- Agoubi, B. 2021. A review: saltwater intrusion in North Africa's coastal areas—current state and future challenges. *Environ Sci Pollut Res*, 28, 17029–17043.
- Akbarpour, A., azizi, M., Najafi mood, M. H., Rezapour, A. A. 2024. Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion in Sandy Beach Aquifer Sloping under Transient Condition. *Journal of Hydraulics*, 20(1), 1-18 (In Persian).
- Akhtar, J., Sana, A., Tauseef, S. M., Tanaka, H. 2022. Numerical Modeling of Seawater Intrusion in Wadi Al-Jizi Coastal Aquifer in the Sultanate of Oman. *Hydrology*, 9(12), Article 211.
- Amiri, V. 2020. Investigation of the saltwater intrusion potential into groundwater resources using numerical modeling (case study: Urmia coastal aquifer). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(26), 161-184. (In Persian).
- Azizi, F., Asghari Moghaddam, A., Nazemi, A. 2019. Groundwater flow and salinity intrusion simulation in malekan plain aquifer. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(45), 32-43. (In Persian).
- Basack, S., Loganathan, M. K., Goswami, G., Khabbaz, H. 2022. Saltwater Intrusion into Coastal Aquifers and Associated Risk Management: Critical Review and Research Directives. *Journal of Coastal Research*, 38(3), 654–672.
- Bayat, M., Eslamian, S., Shams, G., Hajiannia, A. 2020. Groundwater level prediction through GMS software—case study of Karvan area, Iran. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 139-145.
- Dehmardeh, A., Heshmatpour, A., Fathabadi, A., Jandaghi, N. 2024. Investigate the Effect of Wet and Drought on Groundwater Quantity and Quality of Kalaleh city. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, e209385. Doi: 10.22034/nawee.2024.460310.1084 (In Persian).
- Gharemahmoodlu, M., Shirzadnia, J. 2023. Assessment and comparison of the spring and well water resources quality for Drinking and Irrigation Purposes (Case study: East of Gorgan plain. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), 47-66. (In Persian).
- Ghavami, S. M., Mohammadi S. 2025. Monitoring the Quality of Groundwater using Artificial Neural Network Methods, a Case Study of Qorveh and Dehgolan Counties. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, e228306. Doi: 10.22034/nawee.2025.520885.1154
- Gopinath, S., Srinivasamoorthy, K., Saravanan, K. 2016. Modeling saline water intrusion in Nagapattinam coastal aquifers, Tamilnadu, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 2(2), 1-12.
- Hosseinzade Kuhi, H., Ardestani, M. 2024. Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer by using the MODFLOW model. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 1-17 (In Persian).
- Huang PS., Chiu YC. A. 2018. Simulation-Optimization Model for Seawater Intrusion Management at Pingtung Coastal Area, Taiwan. *Water*. 10(3), 251.
- Hussain, M. S., Abd-Elhamid, H. F., Javadi, A. A., Sherif, M. M. 2019. Management of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: A Review. *Water*, 11(12), 2467.
- Kihm, J. H., Kim, J. M., Kim, Y., Kim, S., Yeh, G. T. 2024. Hydrogeologic Framework Model-Based Numerical Simulation of Groundwater Flow and Salt Transport and Analytic Hierarchy Process-Based Multi-Criteria Evaluation of Optimal Pumping Location and Rate for Mitigation of Seawater Intrusion in a Complex Coastal Aquifer System. *Water Resources Research*, 60(6), e2023WR035486.

- Mokhtar, M.A., Chibout, M., Mansouri, B.E., Chao, J., Kili, M., Kanti, S.M. 2018. Modeling of the Groundwater Flow and Saltwater Intrusion in the Coastal Aquifer of Fum Al Wad, Province of Laayoun, Morocco. *International Journal of Geosciences*, 09, 71-92.
- Park, S., Kim, J., Yum, B.W., Yeh, G. 2012. Three-Dimensional Numerical Simulation of Saltwater Extraction Schemes to Mitigate Seawater Intrusion due to Groundwater Pumping in a Coastal Aquifer System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 10-22.
- Roy, D.K., Sarkar, T.K., Munmun, T.H. 2025. A review on the applications of machine learning and deep learning to groundwater salinity modeling: present status, challenges, and future directions. *Discov Water*, 5(1), 1-16.
- Saberimehr, S., Asghari moghaddam, A., Nadiri, A. 2017. Modeling groundwater flow and salinity intrusion at Shabestar plain aquifer using GMS software model. *Quaternary Journal of Iran*, 3(1), 41-50 (In Persian).
- Siarkos, I., Latinopoulos, P. 2016. Modeling seawater intrusion in overexploited aquifers in the absence of sufficient data: application to the aquifer of Nea Moudania, northern Greece. *Hydrogeology Journal*, 24, 2123–2141.
- Sharan, A., Datta, B., Lal, A. 2024. Management of saltwater intrusion using 3D numerical modelling: a first for Pacific Island country of Vanuatu. *Environ Monit Assess*, 196, 120.
- Sherif, M., Kacimov, A., Javadi, A. 2012. Modeling Groundwater Flow and Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Wadi Ham, UAE. *Water Resour Manage*, 26, 751–774.
- Tabari, M.M.R., Abyar, M. 2022. Development a Novel Integrated Distributed Multi-objective Simulation-optimization Model for Coastal Aquifers Management Using NSGA-II and GMS Models. *Water Resour Manage* 36, 75–102.
- Van, T.D., Zhou, Y., Stigter, T.Y. 2023. Sustainable groundwater development in the coastal Tra Vinh province in Vietnam under saltwater intrusion and climate change. *Hydrogeology Journal*, 31, 731–749.
- Wurl, J., Imaz-Lamadrid, M. A., Mendez-Rodriguez, L. C., Hernández-Morales, P. 2023. Hydrochemical Indicator Analysis of Seawater Intrusion into Coastal Aquifers of Semiarid Areas. *Resources*, 12(4), 47.